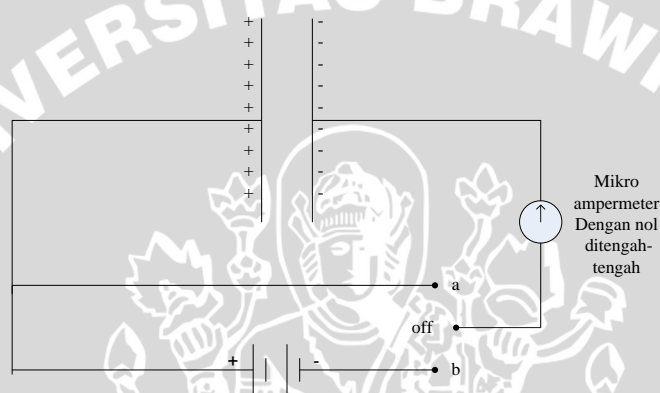


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Kapasitor

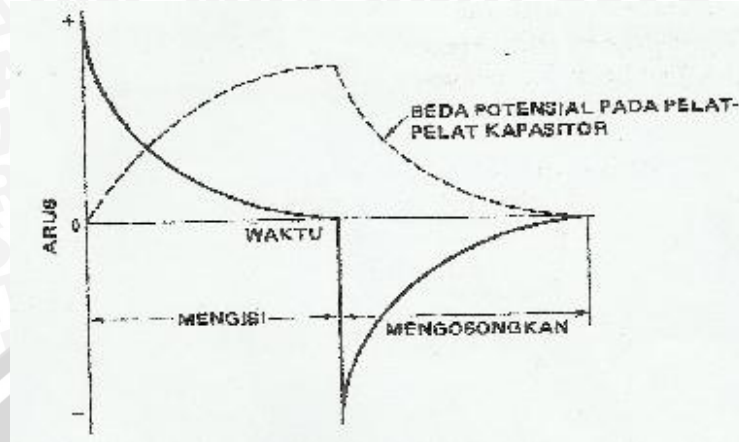
Kapasitor merupakan komponen rangkaian listrik yang dapat menyimpan energi listrik berupa medan listrik. Permukaan konduktor dapat berbentuk pelat lembaran atau pelat silinder. Kapasitor pelat sejajar diperlihatkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian yang melukiskan pengisian dan pengosongan kapasitor  
Sumber:Michael Neidle(1989:38)

Ketika saklar dua arah melakukan kontak dengan b dari posisi tidak tersambung (*off*), suatu arus sesaat lewat yang ditunjukkan oleh jarum ampermeter yang bergerak dalam satu arah. Terdapat beda potensial dengan polaritas seperti yang diperlihatkan antara pelat-pelat kapasitor. Jika saklar dipindahkan keposisi *off*, pelat tidak kehilangan muatan yang menandakan muatan ini telah tersimpan dalam kapasitor. Pengosongan berlangsung karena beda potensial menyebabkan arus lewat dari satu pelat ke pelat lain. Perhatikan bahwa tidak ada arus yang tembus antara kedua pelat. Gerakan arus lebih banyak berwujud osilasi (gerakan mondar mandir) dan bukan berupa suatu aliran kontinu.

Gambar 2.2 menunjukkan arus pengisian dan pengosongan kapasitor terhadap waktu.



Gambar 2.2 Kurva pengisian dan pengosongan kapasitor  
Sumber: Michael Neidle (1989:39)

Bersama sebuah tahanan di dalam rangkaian dan baterai yang tersambung ke kapasitor, arus mula-mula yang diperlihatkan oleh amperemeter naik dengan segera menuju nilai maksimumnya  $E/R$ , dimana  $E$  adalah gaya gerak listrik baterai dan  $R$  adalah tahanan rangkaian. Karena kapasitor menjadi bermuatan, pada pelat timbul perbedaan potensial. Beda potensial ini adalah sedemikian sehingga melawan ggl baterai. Karena kenaikan yang berlawanan ini, arus turun menjadi nol bila beda potensial kapasitor sama dengan tegangan baterai, maka kapasitor tersebut termuati. Hubungan antara arus dan tegangan sekarang dapat dilihat sebagai “*current lead*”. Bila arus berada pada nilai maksimumnya dan positif, beda potensial adalah nol. Bila berkurang menjadi nol, beda potensial mencapai nilai maksimumnya. Pada pengosongan, arus naik dengan cepat ke nilai yang sama seperti pada pengisian, tetapi mengalir dalam arah yang berlawanan. Dan turun menuju nol jika beda potensial turun menjadi nol.

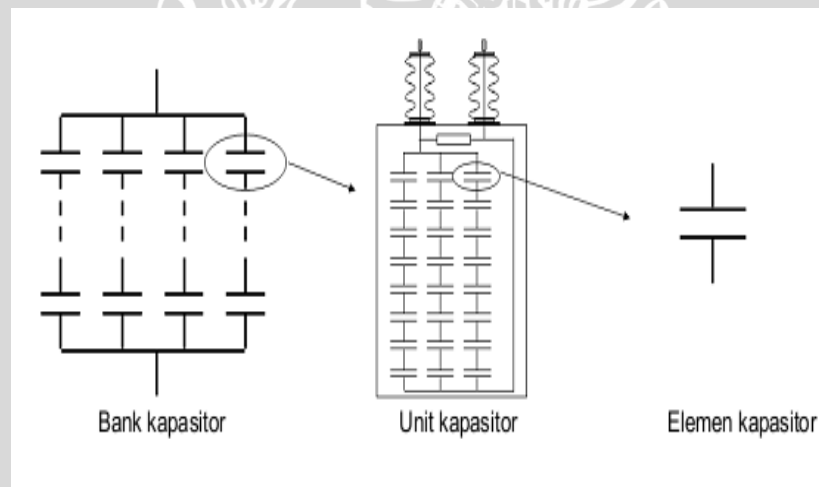
Kapasitor banyak digunakan dalam industri misalnya untuk memperbaiki faktor daya dari sistem, menaikkan level tegangan, serta mengurangi rugi-rugi sistem. Kapasitor yang paling banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik adalah kapasitor elektrostatis dengan kertas kraf sebagai bahan dielektrik utamanya, biasanya kertas tersebut diperkuat dengan minyak atau zat organik lainnya mempertinggi kapasitasnya. Beban kapasitor dalam sistem tenaga listrik

arus bolak-balik akan menyebabkan arus mendahului (*leading*) tegangan. Kapasitor digunakan sebagai kompensator arus induktif yang tertinggal. Metode yang sering digunakan untuk memperbaiki tegangan adalah menggunakan:

- a. Kapasitor *shunt* atau paralel
- b. Kondensator sinkron

### 2.1.1 Kapasitor bank

Kapasitor bank adalah satu unit kapasitor yang terhubung sedemikian hingga yang dapat dikendalikan oleh beberapa komponen *switch* (Christophe Preve,2006:463). Bank kapasitor (*capacitor banks*) adalah peralatan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas pasokan energi listrik antara lain memperbaiki mutu tegangan di sisi beban, memperbaiki faktor daya ( $\cos \phi$ ) dan mengurangi rugi-rugi. Terkait bagian-bagian kapasitor dapat dijelaskan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Bagian-bagian kapasitor bank  
Sumber: PLN(2009:3)

Bagian-bagian kapasitor bank terdiri atas beberapa elemen yaitu:

#### a. Elemen kapasitor

Elemen kapasitor adalah komponen yang terbuat oleh dua elektroda yang dipisahkan oleh dielektrik (Christophe Preve,2006:462). Elemen kapasitor merupakan bagian terkecil dari kapasitor yang berupa aluminium foil dan plastik film.

### b. Unit kapasitor

Sebuah unit kapasitor terdiri dari elemen-elemen kapasitor yang dihubungkan dalam suatu matriks secara seri dan paralel. Unit kapasitor dilengkapi dengan resistor yang berfungsi sebagai elemen pelepasan muatan kapasitor (*discharge device*). Pada IEEE std 18-1992 dan std 1036-1992 dinyatakan bahwa:

1. Unit kapasitor harus mampu beroperasi terus menerus pada rating  $110\% V_{\text{rms}}$  dan tegangan puncak tidak melebihi  $1,2 \sqrt{2} V_{\text{rms}}$  serta harus mampu dilalui arus sebesar  $135\% I_{\text{nominal}}$ .
2. Pada rating tegangan dan frekuensi, daya reaktif harus berkisar antara 100% sampai 115% rating daya reaktif.

### c. Bank kapasitor

Unit-unit kapasitor terpasang dalam rak baja galvanis untuk membentuk suatu bank kapasitor dari unit-unit kapasitor fasa tunggal. Jumlah unit-unit kapasitor pada sebuah bank ditentukan oleh tegangan dan daya yang dibutuhkan. Untuk daya dan tegangan yang lebih tinggi, unit-unit kapasitor dihubungkan secara seri maupun paralel.

#### 2.1.2 Daya dan energi kapasitor

Kapasitansi dalam suatu kapasitor mempunyai satuan Farad (F). Satu Farad dapat didefinisikan sebagai kapasitansi dari suatu kapasitor antara plat-plat dimana terdapat beda potensial sebesar 1 volt ketika diisi oleh medan elektrik yang sebanding dengan 1 coulomb. Kapasitansi sebuah kapasitor didefinisikan sebagai perbandingan besar muatan  $Q$  pada salah satu konduktornya terhadap besar beda potensial  $V$  antara kedua konduktor. Dengan demikian dapat ditulis persamaannya yaitu : (William Hayt, 1991:140)

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

dengan:

$C$  : Kapasitansi (farad)

$Q$  : Muatan listrik (coulomb)

$V$  : Beda potensial (volt)

Kapasitansi dari plat-plat kapasitor dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu:

- Luas area dari medan elektrik
- Jarak antar plat
- Jenis material yang digunakan untuk dielektrik

Reaktansi dalam kapasitor yaitu

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.2)$$

dengan:

C : Kapasitansi (F)

f : Frekuensi (Hz)

Daya reaktif kapasitor ( $Q_c$ ) yang dihasilkan oleh kapasitor adalah: (Cristophe Preve, 2006; 465)

$$Q_c = V^2 \cdot 2\pi f C \quad (2.3)$$

dengan:

V : Tegangan Kapasitor (V)

f : Frekuensi jala-jala (Hz)

C : Kapasitansi (F)

Dengan cara yang sama, diperoleh energi (W) yang tersimpan pada kapasitor jika diberi tegangan V:

$$W = 0,5 \times C \times V^2 \quad (2.4)$$

### 2.1.3 Kapasitor bank sebagai sumber daya reaktif

Beban resistif dan induktif merupakan jenis beban yang banyak digunakan oleh konsumen energi listrik. Sifat beban induktif adalah *lagging*, arus induktif tertinggal oleh tegangan selain itu juga menyerap daya reaktif dalam operasinya.

Sumber daya reaktif dan aktif adalah generator, sedangkan kemampuan generator untuk membangkitkan daya reaktif adalah terbatas, maka perlu penambahan daya reaktif dari luar yaitu dengan kapasitor bank.

### 2.1.4 Kapasitor daya berdasarkan tegangan yang digunakan

Berdasarkan pemasangannya kapasitor daya dibagi menjadi 2 (Longland T, 1984: 136-137):

- Low voltage capacitor bank* memiliki tegangan kerja dibawah 1 kV yaitu 380-400 V.

- b. *High voltage capacitor bank* memiliki tegangan kerja 1 kV dan diatasnya.

### 2.1.5 Konfigurasi pemasangan kapasitor

Ada dua cara pemasangan kapasitor statis pada sistem tenaga listrik yaitu secara seri atau paralel. Macam pemasangan tersebut mempunyai perbedaan yang khusus sesuai tujuan pemakaian. Faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihan antara kapasitor paralel atau seri diperlihatkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tujuan Kapasitor Di Seri Atau Paralel

No	Tujuan	Pemilihan kapasitor	
		Seri	Paralel
1	Memperbaiki faktor daya (fd)	Kedua	Pertama
2	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan faktor daya normal dan rendah	Pertama	Kedua
3	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan faktor daya tinggi	-	Pertama
4	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan faktor daya rendah	Pertama	-
5	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran bawah tanah dengan faktor daya tinggi	-	-
6	Mengurangi kerugian saluran	Kedua	Pertama
7	Mengurangi fluktuasi tegangan	Pertama	-

Catatan: (-) tidak digunakan

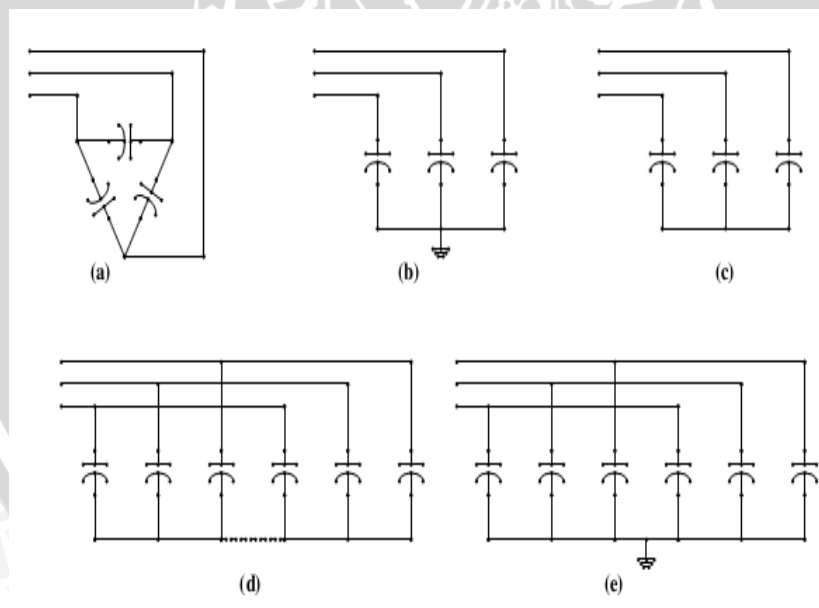
Sumber: AS.Pabla (1989: 366)

Kapasitor dipasang seri dan paralel pada sistem tenaga listrik menimbulkan daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya dan tegangan, karena dapat menambah kapasitas sistem dan mengurangi kerugian. Kapasitor yang dipasang seri, daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus beban, sedangkan pada kapasitor yang dipasang paralel sebanding dengan kuadrat tegangan. Secara umum, pemasangan kapasitor secara seri lebih tinggi dari pada biaya pemasangan kapasitor secara paralel. Sebab peralatan perlindungan untuk kapasitor seri lebih kompleks, biasanya kapasitor tersebut didesain untuk daya yang besar dari pada kapasitor paralel, (AS.Pabla,1989:365).

Pemasangan kapasitor secara paralel sangat penting untuk melayani kebutuhan daya reaktif dalam sebuah sistem tenaga listrik. Pemasangan kapasitor disisi beban, sebagian besar arus reaktif dipenuhi dari kapasitor dan dari saluran hanya menyalurkan daya aktif saja. Keadaan seperti ini sangat menguntungkan sehingga dapat mengurangi susut tegangan pada jaringan.

### 2.1.6 Hubungan kapasitor bank

Kapasitor bisa dihubungkan dalam berbagai bentuk seperti bintang ditanahkan, bintang yang tidak ditanahkan, delta dan sebagainya seperti pada Gambar 2.4 hubungan pemasangan kapasitor secara delta hanya dipakai satu bagian seri tiap fasa, dan hanya dipakai pada tegangan rendah, untuk tegangan selebihnya dipakai sambungan bintang. Untuk sambungan bintang pada umumnya netral kapasitor hanya ditanahkan bila sistem atau transformator substasiun ditanahkan secara efektif. Konfigurasi pemasangan kapasitor bank ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Hubungan dasar *Capacitor Bank*

(a) *Delta*. (b) *Grounded wye*. (c) *Ungrounded wye*. (d) *Ungrounded double wye (neutrals may or may not be tied.)* (e) *Grounded double wye*.

Sumber: IEEE(C37.99,1980:10)

Jumlah minimum unit yang terhubung paralel diperhitungkan apabila satu unit kapasitor terisolasi, tidak akan menyebabkan *unbalance* tegangan pada unit

kapasitor lainnya melebihi 110% rating tegangan. Jumlah minimum dari group kapasitor yang terhubung seri apabila satu group tereliminasi (hubung singkat) tidak akan menyebabkan kapasitor lain *overvoltage* lebih dari 110%. Jumlah maksimum unit kapasitor pada setiap group paralel ditentukan oleh beberapa pertimbangan. Jika unit kapasitor rusak, unit kapasitor lain pada group paralel yang sama masih memiliki sejumlah muatan. Muatan sisa tersebut akan dibuang melalui kapasitor yang rusak dan melalui masing-masing fuse. Kapasitor yang rusak dan fuse harus tahan terhadap arus transient akibat pelepasan muatan tersebut (PLN, 2009:7).

Pelepasan muatan transien dari paralel kapasitor dalam jumlah besar dapat memecahkan kapasitor yang rusak atau meledakkan fuse, yang dapat menyebabkan kerusakan pada unit terdekat atau kerusakan pada bank kapasitor. Untuk meminimalkan risiko diatas maka harus dibatasi energi maksimum yang tersimpan dalam group paralel kapasitor. Hal ini dapat dicapai dengan mengatur lebih banyak jumlah kapasitor dengan rating tegangan yang lebih kecil terhubung seri sehingga jumlah unit kapasitor dalam paralel group akan lebih sedikit tetapi mengurangi sensitivitas deteksi *unbalance*.

### 2.1.7 Penempatan kapasitor bank

Penempatan kapasitor dikenal dengan 2 metode yaitu (Longland T, 1984: 137) :

a. *Individual methode*

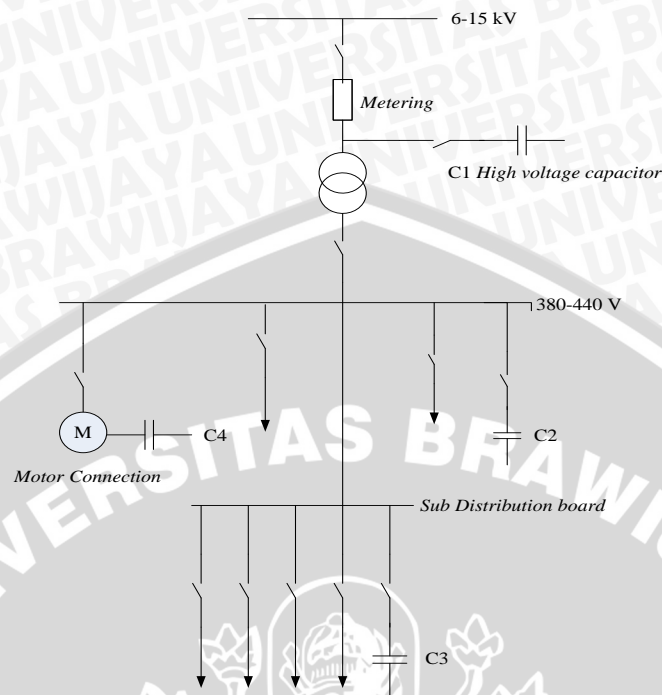
Pada *individual methode*, dilakukan dengan menempatkan kapasitor secara terpecah dan pemasangannya dilakukan pada masing-masing beban. Pemasangan *individual methode* seperti Gambar 2.5 di C<sub>4</sub>

b. *Group methode*

Pada *group methode*, pada sistem tenaga listrik menggunakan sejumlah kapasitor yang dibentuk dalam kapasitor bank. Pemakaian *group methode* di pasang pada *feeder* seperti pada Gambar 2.5 di C<sub>1</sub> atau gardu induk.



Penempatan kapasitor bank ditunjukkan oleh Gambar 2.5



Gambar 2.5 Lokasi penempatan kapasitor bank  
Sumber: Longland T, 1984: 137

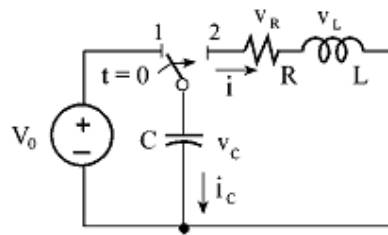
## 2.2 Transien

Gejala transien merupakan perubahan nilai tegangan atau arus maupun keduanya dalam jangka waktu tertentu dari kondisi tunak (*steady state*). Penyebabnya adalah dari faktor eksternal atau lingkungan misalnya petir dan dapat juga akibat perlakuan dari sistem itu sendiri atau faktor internal seperti proses *switching*.

Transien sudah lama digunakan dalam istilah tenaga listrik sebagai suatu kejadian yang sebenarnya tidak diinginkan dan sifatnya sangat cepat, namun merupakan kejadian alami yang sulit dicegah. Kondisi transien dapat berupa tegangan ataupun arus. Untuk transien arus lebih dikenal secara khusus sebagai arus *inrush*.

Pada rangkaian listrik, transien merupakan karakteristik respon alami tegangan atau arus dari sistem yang terdiri dari komponen resistif (R), induktif (L), dan kapasitif (C). Ada tiga respon yang dikenal yaitu respon alami kurang teredam (*underdamped*), teredam kritis (*criticallly damped*), dan sangat teredam (*overdamped*).

Rangkaian RLC seri ditunjukkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Rangkaian RLC seri  
Sumber: Arieh L. Shenkman (2005: 127)

Secara matematis dalam ilmu rangkaian listrik dapat dijelaskan 3 kondisi tersebut. Suatu rangkaian listrik sederhana yang terdiri dari komponen aktif R dan komponen pasif L dan C dirangkai secara seri seperti Gambar 2.6. Dari Gambar 2.6 dengan menggunakan persamaan diferensial orde dua dapat diturunkan persamaan tegangannya yaitu:

Saklar posisi (1) :

$$v_R + v_L + v_C - v = 0$$

$$v_R + v_L + v_C = v$$

Saklar posisi (2) :

$$v_R + v_L + v_C = 0$$

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt = 0$$

$$R \frac{di(t)}{dt} + L \frac{d^2i(t)}{dt^2} + \frac{i(t)}{C} = 0$$

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0 \tag{2.5}$$

Dengan menggunakan persamaan diferensial orde 2 dan pemisalan  $i = Ae^{st}$ , maka didapatkan :

$$L As^2 e^{st} + R Ase^{st} + \frac{1}{C} Ae^{st} = 0$$

$$Ae^{st} \left( Ls^2 + Rs + \frac{1}{C} \right) = 0$$

$$Ls^2 + Rs + \frac{1}{C} = 0 \tag{2.6}$$

$$\text{maka } s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$\text{Atau } s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}; \quad \alpha = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

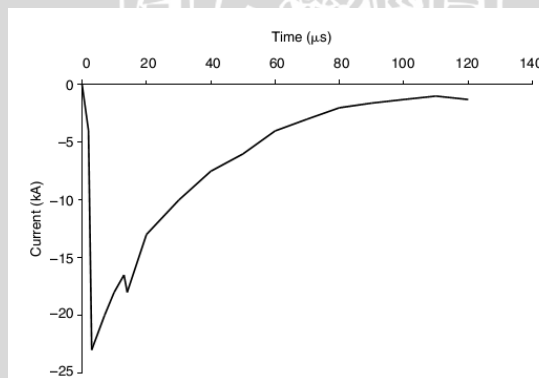
- Untuk  $\alpha^2 > \omega_0^2$ , merupakan kondisi *overdamped*.
- Untuk  $\alpha = \omega_0$ , merupakan kondisi *criticallydamped*.
- Untuk  $\alpha^2 < \omega_0^2$ , merupakan kondisi *underdamped*.

Pada dasarnya, dalam bidang ilmu ketenagalistrikan hanya ada dua jenis transien yang dikenal yaitu (Roger C. Dugan:16-17):

- Oscillatory transient*, memiliki respon transien sama seperti *underdamped*.
- Impulsive transient*, yang merupakan perwakilan dari kondisi *overdamped* dan *underdamped*.

### 2.2.1 Transien impulsif

Transien impulsif adalah suatu respon kondisi lonjakan sesaat karakteristik arus atau tegangan tanpa mengubah frekuensi dari kondisi tunak dengan bentuk gelombang yang memiliki polaritas searah yaitu polaritas positif atau negatif. (Roger C. Dugan:15). Bentuk gelombangnya sesuai dengan persamaan eksponensial murni. Salah satu penyebab transien impulsif adalah sambaran petir seperti Gambar 2.7.



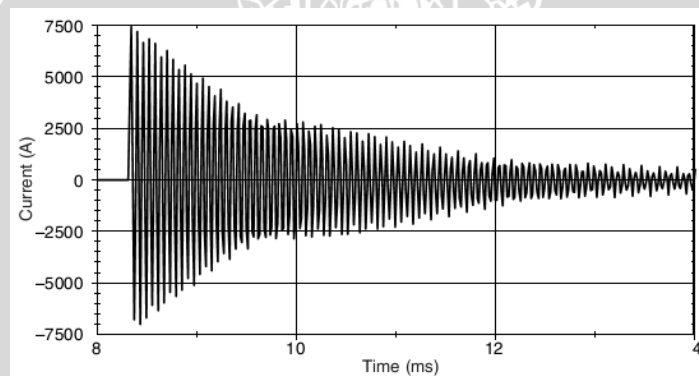
Gambar 2.7 Transien impulsif dari arus petir  
Sumber : Sumber: Roger C. Dugan:16

Transien impulsif sering kali ditinjau dari beberapa karakteristik penting yang menunjukkan kondisi respon impulsif tersebut, seperti besar respon maksimum ( $I_{max}$  atau  $V_{max}$ ), waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi maksimum dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak. Karakteristik tersebut dinyatakan oleh notasi, contohnya  $1,2 \times 50 \mu s$  2000 V artinya

transien impulsif nilainya naik dari nol menuju puncak 2000V dalam waktu 1,2 mikrodetik dan turun sampai setengahnya dalam waktu 50 mikrodetik. Karena transien ini berada dalam frekuensi yang tinggi maka bentuk dari gelombang peralihan dapat berubah secara cepat oleh komponen rangkaian dan akan mempunyai bentuk gelombang yang berbeda bila dilihat pada komponen lain dari sistem daya.

### 2.2.2 Transien osilasi

Transien osilasi dalam suatu respon lonjakan sesaat dari karakteristik arus atau tegangan tanpa mengubah frekuensi dari kondisi tunak. Dengan bentuk gelombang yang memiliki polaritas bolak balik (positif dan negatif) (Roger C. Dugan, :16). Transien osilasi ini dapat terjadi karena adanya gangguan atau operasi pensaklaran seperti Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Transien osilasi karena switching kapasitor bank  
Sumber: Roger C. Dugan;17

Bentuk gelombang transien osilasi sesuai dengan persamaan eksponensial dengan fungsi sinusoidal. Sama seperti transien impulsif, transien osilasi juga ditinjau dari respon maksimum ( $I_{max}$  atau  $V_{max}$ ), waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi maksimum dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak.

Dalam bidang ilmu ketenagalistrikan, transien osilasi dibagi menjadi 3 yaitu:

1. Transien osilasi frekuensi tinggi, dengan frekuensi lebih dari 500 kHz dan kondisi waktunya terukur dalam mikrodetik untuk beberapa siklus.

Transien ini biasanya terjadi karena respon dari sistem terhadap transien impulsif.

2. Transien osilasi frekuensi menengah, dengan frekuensi diantara 5 – 500 kHz dan kondisi waktunya terukur dalam mikrodetik. Transien ini terjadi karena pensaklaran kapasitor atau pensaklaran beban. Transien ini terjadi karena respon dari sistem terhadap transien impulsif.
3. Transien osilasi frekuensi rendah dengan dibawah 5 kHz an durasi waktunya 0,3 – 0,5 ms. Transien ini biasanya terjadi pada sistem subtransmisi dan distribusi. Sering terjadi saat pelepasan energi dari kapasitor bank yang menghasilkan transien dengan frekuensi 300 - 500 Hz.

### 2.3 Penyebab Transien Dalam Kapasitor

Penyebab fenomena transien adalah perubahan parameter rangkaian, yang biasanya terjadi akibat pensaklaran, rangkaian terbuka (*open circuit*) atau hubung singkat (*short circuit*), perubahan dalam operasi sumber dan lain-lain. Perubahan arus dan tegangan selama transien tidak berlangsung *instant* dan membutuhkan waktu, walaupun perubahan ini terjadi secara cepat dalam hitungan milidetik atau bahkan mikrodetik.

Perubahan yang sangat cepat ini bagaimanapun juga tidak dapat terjadi secara seketika karena proses transien dicapai melalui pertukaran energi, yang biasanya tersimpan dalam medan magnet dari induktansi atau medan listrik dari kapasitansi. Perubahan energi tidak dapat terjadi secara mendadak karena akan menghasilkan daya yang tidak terbatas (daya adalah turunan dari energi,

$$P = \frac{dW}{dt}.$$

Semua perubahan parameter saat transien kemudian menghilang, dan akan muncul keadaan tunak baru. Dalam hal ini transien dapat didefinisikan sebagai perilaku rangkaian diantara dua keadaan tunak, yaitu keadaan tunak yang lama (sebelum perubahan) dan keadaan tunak yang baru (setelah perubahan).

Dalam analisa rangkaian listrik harus dibedakan antara operasi statis atau keadaan tunak, dan operasi dinamis keadaan transien. Sebuah rangkaian listrik dikatakan dalam keadaan tunak yaitu saat variabelnya ( tegangan, arus, dan lain-

lain) menunjukkan perikalu dari masing-masing variabel tersebut tidak berubah terhadap waktu (pada rangkaian searah) atau berubah secara periodik pada rangkaian bolak-balik). Rangkaian mengalami keadaan transien saat variabelnya berubah tidak secara periodik.

Dalam rangkaian yang terdapat komponen induktansi (L) dan kapasitansi (C), parameter L dan C dikarakteristikan mempunyai kemampuan untuk menyimpan energi, tetapi paling dominan dalam proses transien saat *switching* kapasitor bank adalah kapasitor. Energi listrik ( $W_e$ ) pada C yaitu (William Hayt, 1993:142):

$$W_e = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.7)$$

$$Q = C \cdot V \text{ (dalam medan listrik)}$$

Sumber arus dan tegangan adalah elemen dimana energi disuplai kerangkaian, dapat dikatakan rangkaian listrik sebagai sistem fisik. Pada kondisi tunakanya energi yang tersimpan dalam kapasitansi, dan disuplai ke sumber rangkaian searah adalah konstan mengingat dalam rangkaian bolak-balik energi diubah (perubahan medan listrik dan disuplai kesumber) secara periodik.

Saat terdapat perubahan tiba-tiba dalam rangkaian bolak-balik, biasanya ada redistribusi energi dari kapasitor, dan perubahan dalam energi sumber yang diperlukan oleh kondisi baru. Redistribusi energi tidak bisa terjadi seketika tetapi membutuhkan waktu, maka menghasilkan keadaan transien. Alasan utama dari pernyataan ini adalah energi yang seketika membutuhkan daya yang tidak terbatas. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, daya adalah turunan dari energi dan perubahan seketika dalam energi akan menghasilkan daya. Dari sudut pandang secara fisik dapat dikatakan bahwa keadaan transien terjadi dalam sistem fisik saat terjadi kondisi energi dari satu keadaan tunak sedang diubah ke yang lain.

Mengubah energi listrik memerlukan perubahan tegangan pada kapasitor yang diberikan oleh  $V = \frac{Q}{C}$ , dimana q adalah besarnya muatan, maka baik tegangan pada kapasitor maupun muatannya bisa berubah seketika. Tingkat dari perubahan tegangan adalah  $\frac{dV}{dt} = \left(\frac{1}{C}\right) \frac{dQ}{dt} = \frac{i}{C}$  dan perubahan seketika dari tegangan akan menghasilkan arus.

Adanya pensaklaran, interupsi, rangkaian hubung singkat, atau apapun perubahan yang sangat cepat yang terjadi dalam rangkaian listrik fenomena transien akan muncul. Dalam jaringan sistem daya fenomena transien tidak diinginkan karena saat transien meningkatkan nilai dari arus, tegangan, dan kerapatan energi pada sebagian atau semua sistem daya. Semua itu dapat menghasilkan distorsi peralatan, kenaikan suhu, dan kerusakan elektrodinamik, interferensi stabilitas sistem, dan pada kasus ekstrim dapat menyebabkan kerusakan dari keseluruhan sistem.

Fenomena transien yang terjadi pada rangkaian listrik bisa dikarenakan pensaklaran yang disengaja, termasuk di dalam peralatan untuk pensaklaran, atau juga pensaklaran yang tidak disengaja yang dapat berasal dari adanya gangguan pentanahan (*ground fault*), rangkaian hubung singkat, kerusakan induktor dan atau kapasitor, dan juga sambaran petir.

#### 2.4 Arus *Inrush*

Arus *inrush* dapat didefinisikan sebagai besarnya lonjakan arus yang pertama kali muncul pada rangkaian, saat rangkaian terhubung dengan beban (AS.Pabla;1989,371). Operasi penutupan dan pembukaan saklar pada suatu rangkaian listrik akan menyebabkan adanya lonjakan tegangan dan arus. Pada suatu rangkaian listrik ketika saklar ditutup maka akan terdapat lonjakan arus yang besar. Lonjakan arus yang terjadi sangat singkat, dalam skala mikrodetik sampai milidetik. Lonjakan arus inilah yang disebut sebagai arus transien dan sering disebut arus *inrush*.

Sama halnya dengan fenomena transien, arus *inrush* dalam rangkaian listrik dianggap sebagai hal yang tidak diinginkan. Pada setiap peralatan listrik pasti terjadi arus *inrush*. Arus *inrush* berbahaya bagi sistem ketika nilai puncak arus *inrush* terjadi sangat besar.

Pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik, nilai puncak arus *inrush* yang besar biasanya disebabkan oleh *energizing* transformator dan *switching* kapasitor. Ketika sebuah kapasitor bank dihubungkan pada sebuah sumber tegangan, maka akan ada arus transien yang mengalir pada kapasitor tersebut. Besar dan frekuensi dari arus *inrush* ini tergantung dari nilai kapasitansi,

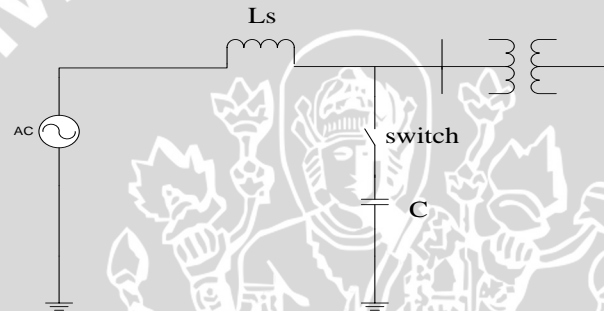
induktansi suatu rangkaian, muatan akhir pada kapasitor bank dan tahanan yang terdapat pada rangkaian.

Besar dan frekuensi arus *inrush* juga dipengaruhi oleh konfigurasi kapasitor bank, yaitu tunggal (*isolated bank*) atau paralel. Arus yang tinggi terjadi beberapa saat kapasitor dihubungkan ke sistem, dan arus ini membahayakan peralatan listrik.

#### 2.4.1 Kapasitor bank tunggal terisolasi (*isolated capacitor bank*)

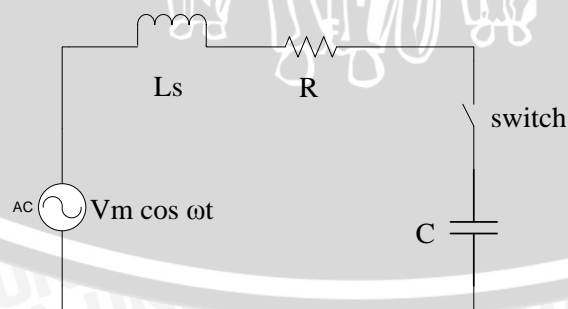
Arus *inrush* dari kapasitor bank bergantung pada reaktansi induktif antara step dari kapasitor dan tegangan saat *switch* menutup.

*Single line* pemasangan kapasitor bank tunggal ditunjukkan Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pemasangan kapasitor tunggal  
Sumber: IEEE Std 1036,1992: 23

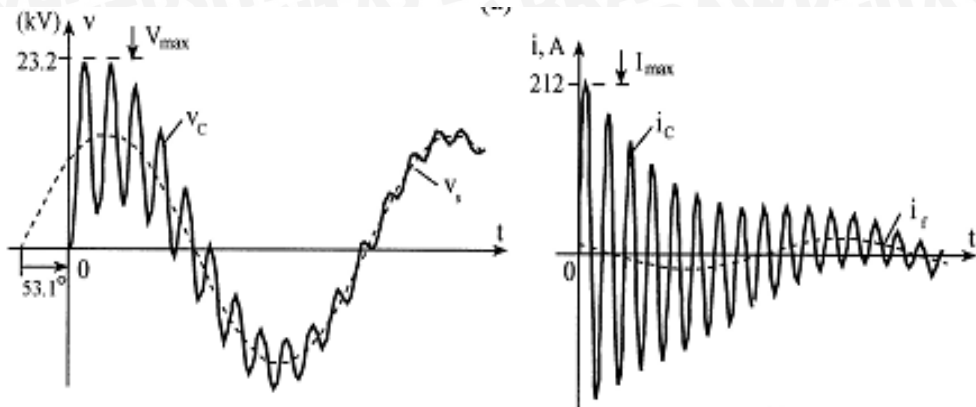
Dari Gambar 2.9 apabila saklar ditutup, maka arus *inrush* akan mengalir dan mengalami perubahan tegangan pada kapasitor. Dari Gambar 2.9 dapat disederhanakan menjadi Gambar 2.11.



Gambar 2.10 Rangkaian pengganti pada kapasitor tunggal  
Sumber: Sumber: IEEE Std 1036,1992: 21

Sedangkan gelombang dari arus *inrush* dan tegangan kapasitor tunggal ditunjukkan pada Gambar 2.11.





Gambar 2.11 Tegangan dan arus *inrush* saat pengisian kapasitor tunggal.  
Sumber: Arieh L. Shenkman, 2005:151

Nilai dari arus *inrush* pada Gambar 2.10 dapat diturunkan menggunakan Hukum Kirchoff diasumsikan R diabaikan sebagai berikut:

$$V_m \cos(\omega t + \theta) = V_c + L \frac{di}{dt} \quad (2.8)$$

Sendangkan

$$V_c = V_c(0) + \frac{1}{C} \int i \cdot dt \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) didistribusikan keadaan persamaan (2.8) dan diasumsikan dalam periode bahwa sumber tegangan konstanta pada nilai puncak, kemudian ditrasformasikan maka: (Greenwood, Allan 1991:47)

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i \cdot dt = V_c - V_e(0) \quad (2.10)$$

Dimana  $i(0)=0$  dan bila diketahui  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  maka persamaan (2.10) dapat ditulis

$$\frac{LCs^2 i(s) + i(s)}{sC} = \frac{V_m - V_c(0)}{s} \quad (2.11)$$

$$\frac{i(s)LC(s^2 + \frac{1}{LC})}{sC} = \frac{V_m - V_e(0)}{s}$$

$$\frac{i(s)L(s^2 + \omega_0^2)}{sC} = \frac{V_m + V_c(0)}{s}$$

$$i(s) = \frac{V_n - V_c(0)}{L} \left( \frac{1}{s^2 + \omega_0^2} \right)$$

$$i(s) = \frac{V_n - V_c(0)}{L} \cdot \frac{1}{\omega_0} \cdot \left( \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \right) \quad (2.12)$$

Pada persamaan 2.12 di inverskan menjadi : (Greenwood, Allan,1991:47)

$$i(t) = \frac{V_n - V_c(0)}{L} \cdot \sqrt{LC} \cdot \sin. \omega_0 \cdot t$$

$$i(t) = (V_n - V_c(0)) \cdot \sqrt{LC} \cdot \sin. \omega_0 \cdot t \quad (2.13)$$

Arus mengalir secara sinusoida pada frekuensi alamiah pada rangkaian LC, Pada Gambar 2.11 jika saklar ditutup, maka akan terjadi pengisian pada kapasitor dimana kondisi  $V_c(0)=0$ , sehingga persamaan (2.13) menjadi:

$$i(t) = V_m \sqrt{\frac{C}{L}} \sin. \omega_0 \cdot t \quad (2.14)$$

Dari persamaan (2.14) maka nilai arus maksimumnya dengan tegangan puncak  $\sqrt{2} \cdot V_{L-N}$  maka:

$$I_{\max pk} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{LL}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L}} \text{ (A)} \quad (2.15)$$

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{10^6}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Hz)} \quad (2.16)$$

Dengan:

$I_{\max pk}$  = crest value / nilai arus *inrush* maksimum

$f$  = frekuensi arus *inrush*

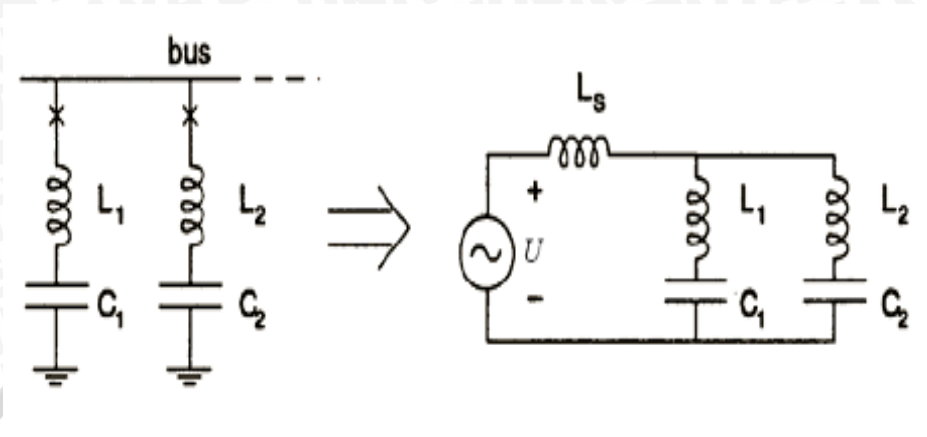
Apabila sumber tegangan konstanta  $V_m \cdot \cos. \omega t$ , maka persamaan arus *inrush*-nya

$$\text{Dengan } V_c(t=0) = \sqrt{2} \frac{V_m}{\sqrt{3}}$$

$$i(s) = \frac{(V_m - V_c(0))s^2 - V_c(0)\omega^2}{L(s^2 + \frac{1}{LC})(s^2 + \omega^2)} \quad (2.17)$$

$$i(s) = \frac{(V_m - V_c(0))s^2 - V_c(0)\omega^2}{L(s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC})(s^2 + \omega^2)} \text{ dengan adanya R.} \quad (2.18)$$

Ada rangkaian dimana 2 kapasitor terhubung ke bus ditunjukkan pada Gambar 2.12.  $L_1$  dan  $L_2$  induktansi antara saklar dan kapasitor.  $L_s$  adalah induktansi dari sumber yang nilainya lebih besar dari  $L_1$  dan  $L_2$ .



Gambar 2.12 Kapasitor bank yang diparalel  
 Sumber: IEEE Std C37.012 (2005: 15)

Untuk kapasitor bank tunggal terisolasi (*isolated capacitor bank*)  $C_1$  terhubung dengan bus ( $C_2$  dianggap tidak ada). Induktansi sumber  $L_s$  seri dengan kapasitor bank  $C_1$ .  $L_1$  dapat diabaikan karena  $L_s \gg L_1$ , puncak arus *inrush* ( $i_{i\ peak}$ ) dan frekuensi arus *inrush* ( $f_i$ ) menggunakan impedansi sumber  $L_s$ . Arus *inrush* dan frekuensi *inrush* nilainya mendekati impedansi sumber yaitu sebesar arus hubung singkat sumber.

Asumsikan kapasitor bank  $C_1$  terhubung ke bus dan kapasitor bank  $C_2$  tidak terhubung ke bus, maka menggunakan persamaan (IEEE Std C37.012-2005:15)

$$i_i = \hat{u} \sqrt{\frac{C_1}{L_s}} \sin \omega_i t \tag{2.19}$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L_1)C_1}} \tag{2.20}$$

dengan:

$i_i$  : Arus *inrush* (A)

$\hat{u}$  : Puncak sumber tegangan (V)

$\omega_i$  :  $2\pi f_i$  : Sudut frekuensi arus *inrush* (rad/s) dan  $f_i$  = frekuensi arus *inrush* (Hz)

Karena  $L_s \gg L_1$ , frekuensi arus *inrush* menjadi:

$$f_i = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_1}} \quad (2.21)$$

Puncak arus *inrush* yang tinggi diperoleh saat *switching* kapasitor bank di suplai oleh tegangan puncak adalah

$$i_{i\ peak} = V\sqrt{2} \sqrt{\frac{C_1}{L_s}} \quad (2.22)$$

dengan dan  $I_1 = \omega_s V C_1$

$$f_i = f_s \sqrt{\frac{I_{SC}}{I_1}} \quad (2.23)$$

$$I_{SC} = \frac{V}{\omega_s L_{eq}} \text{ dan } i_{i\ max} = \sqrt{2} \sqrt{I_{SC} I_1} \quad (2.24)$$

dengan:

$f_s$  : Frekuensi sistem tenaga listrik (50 Hz atau 60 Hz)

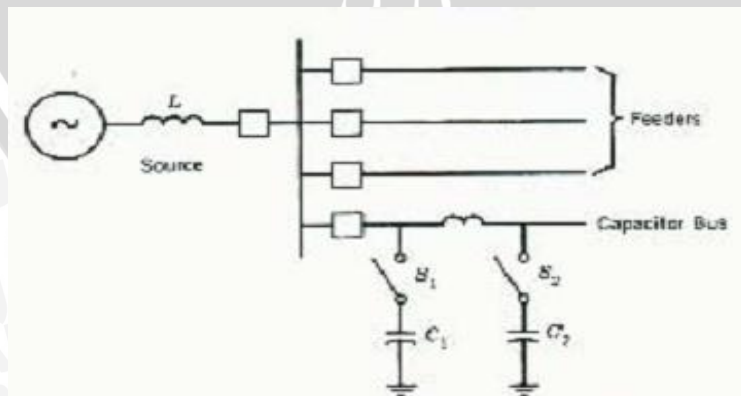
$I_{SC}$ : Arus hubung singkat (A,rms)

$I_1$  : Arus pada kapasitor bank  $C_1$  (A,rms)

#### 2.4.2 Kapasitor bank paralel

Arus *inrush* akan semakin bertambah dengan bertambahnya kapasitor yang dimasukkan kedalam sistem. Hal ini disebabkan karena saat pengisian kapasitor sedang berlangsung terjadi pengalihan energi ke kapasitor yang lain untuk melakukan pengisian juga. Besarnya arus *inrush* dari kapasitor paralel tergantung pada nilai kVAR masing-masing kapasitor dan reaktansi induktif antara unit-unit kapasitor serta tegangan sesaat pada saat *switching*.

Model pemasangan kapasitor bank secara paralel diperlihatkan seperti Gambar 2.13.



Gambar 2.13 *Single line* kapasitor paralel

Sumber: Greenwood, Allan(1991:43)

Dari Gambar 2.13 kapasitor-kapasitor dimasukkan sesuai kebutuhan bila sistem tersebut memerlukan kapasitor  $C_1$  masuk maka  $S_1$  ditutup dan arus akan mengalir ke  $C_1$  bila masih kurang selanjutnya kapasitor  $C_2$  dimasukkan dengan menutup  $S_2$ .

Jika pada Gambar 2.13 kapasitor bank  $C_1$  terhubung ke bus dan kapasitor bank  $C_2$  juga terhubung ke bus maka  $C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$  dan  $L_{eq} = L_1 + L_2$  sehingga: (IEEE Std C37.012-2005: 16)

$$i_{i \text{ peak}} = V \sqrt{2} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}} \quad (2.25)$$

Kondisi ini dapat mencapai nilai yang ekstrim karena sangat kecilnya nilai  $L_{eq}$ . Besar frekuensi arus *inrush* yaitu: (IEEE Std C37.012-2005: 17)

$$f_i = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{eq} C_{eq}}} \quad (2.26)$$

Masukan  $C_{eq}$  dan  $L_{eq}$  kedalam persamaan (2.25), maka persamaan arus *inrush* dan frekuensinya menjadi

$$i_{i \text{ peak}} = V \sqrt{2} \sqrt{\frac{I_1 I_2}{\omega_s L_{eq} (I_1 + I_2)}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{V \times I_1 \cdot I_2}{\omega_s L_{eq} (I_1 + I_2)}} \quad (2.27)$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega_s V (I_1 + I_2)}{L_{eq} I_1 I_2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_s V (I_1 + I_2)}{L_{eq} I_1 I_2}} \quad (2.28)$$

Terhubung dengan kapasitor bank  $C_{n+1}$  dengan n kapasitor bank yang terhubung paralel, maka:

$$L' = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_1} + \dots + \frac{1}{L_n}} \quad (2.29)$$

$$C' = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Untuk mendapatkan puncak arus *inrush* dan frekuensinya dapat diselesaikan dengan persamaan (2.28).  $C_{eq}$  dapat diperoleh dengan mensubstitusikan  $C_1$  menjadi  $C'$  dan  $C_2$  menjadi  $C_{n+1}$ .  $L_{eq}$  dapat diperoleh dengan mensubstitusikan  $L_1$  menjadi  $L'$  dan  $L_2$  menjadi  $L_{n+1}$  maka persamaannya menjadi

$$C_{eq} = \frac{C' \times C_{n+1}}{C' + C_{n+1}} \text{ dan } L_{eq} = L' + L_{n+1}$$

dengan

$$L_1 = L_2 + L_3 + \dots + L_{n+1} = L \text{ dan } C_1 = C_2 + C_3 + \dots + C_{n+1} = C,$$

$$L' = \frac{L}{n} \text{ dan } C' = nC,$$

$$C_{eq} = \frac{nC \times C}{nC+C} = \frac{n}{n+1}C \text{ dan } L_{eq} = \frac{L}{n} + L = \frac{n+1}{n}L$$

$$i_{i \text{ peak}} = V \sqrt{2} \frac{n}{n+1} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.30)$$

dan

$$f_i = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.31)$$

Dalam kasus ini, persamaan (2.27) dan persamaan (2.28) ditransformasikan ke persamaan (2.32) dan persamaan (2.33) masing-masing menjadi: (IEEE Std C37.012-2005: 18)

$$i_{i \text{ peak}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{10^3 V_r I_1 I_2}{2\pi f_s \sqrt{3} \times 10^{-6} L_{eq} (I_1 + I_2)}}$$

$$= 13556 \sqrt{\frac{V_r I_1 I_2}{f_s L_{eq} (I_1 + I_2)}} \approx 13500 \sqrt{\frac{V_r I_1 I_2}{f_s L_{eq} (I_1 + I_2)}} \quad (2.32)$$

dan

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi f_s 10^3 V_r (I_1 + I_2)}{\sqrt{3} \times 10^{-6} L_{eq} I_1 I_2}} \approx 9,5 \sqrt{\frac{f_s V_r (I_1 + I_2)}{L_{eq} I_1 I_2}} \quad (2.33)$$

dengan:

- $f_i$  : Frekuensi arus *inrush* (Hz)
- $f_s$  : Frekuensi sistem (Hz)
- $I_1, I_2$  : Arus kapasitor bank (A,rms)
- $i_{i \text{ peak}}$  : Puncak arus *inrush* (A,rms)
- $L_{eq}$  : Induktansi ekuivalen ( $\mu$ H)
- $V_r$  : Rating tegangan (kV,rms)

Perhitungan tingkat perubahan arus *inrush* terhadap waktu

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\pi f_i i_{i \text{ max}}}{10^6} \text{ A}/\mu\text{s} \quad (2.34)$$

Amplitudo arus *inrush* untuk kondisi *back to back* dari kapasitor bank secara umum beberapa kilo amper dengan frekuensi beberapa kHz. Tipe nilainya diberikan dalam ANSI Std C37.06 mungkin diperlukan untuk membatasi arus

tersebut. Pembatasan tersebut dapat dilakukan dengan memasukkan seri tambahan induktansi dalam rangkaian (misalnya reaktor).

Arus rms kapasitor bank yang mengalir pada kapasitor merupakan arus nominal yang dipengaruhi oleh 3 faktor: (IEEE Std C37.012-2005: 32-33)

- a. Faktor tegangan : untuk menghitung kapasitansi dari kapasitor bank pada tegangan yang digunakan, dapat diperoleh dengan mengalikan daya reaktif yang tercantum pada *name plate* kapasitor dan rasio tegangan maksimal yang digunakan pada tegangan kapasitor yang terdapat pada *name plate* kapasitor. Faktor ini biasanya 1,1 ketika sebuah kapasitor dioperasikan terus-menerus sampai 10% dari tegangan rata-rata kapasitor.
- b. Toleransi pada kapasitor adalah 0 sampai 15 % atau rata-rata lebih dari 0 sampai 5%. Faktor pengali antara 1,05 sampai 1,15 digunakan untuk menyesuaikan arus nominal dengan batas toleransi dalam kapasitansi yang diijinkan.
- c. Komponen harmonisa: kapasitor yang mempunyai impedansi yang kecil menyebabkan mengalirnya arus harmonisa pada rangkaian. Faktor pengali 1,1 umumnya digunakan pentanahan netral kapasitor bank dan 1,05 untuk netral kapasitor yang tidak ditanahkan.

Apabila informasi tentang faktor pengali untuk faktor-faktor diatas tidak ada, biasanya menggunakan faktor pengali 1,25 dikalikan arus nominal kapasitor pada tegangan rata-rata untuk netral kapasitor yang tidak ditanahkan dan 1,35 dikalikan arus nominal untuk netral kapasitor ditanahkan. Tabel 2.2 menunjukkan nilai rata-rata induktansi diantara kapasitor bank

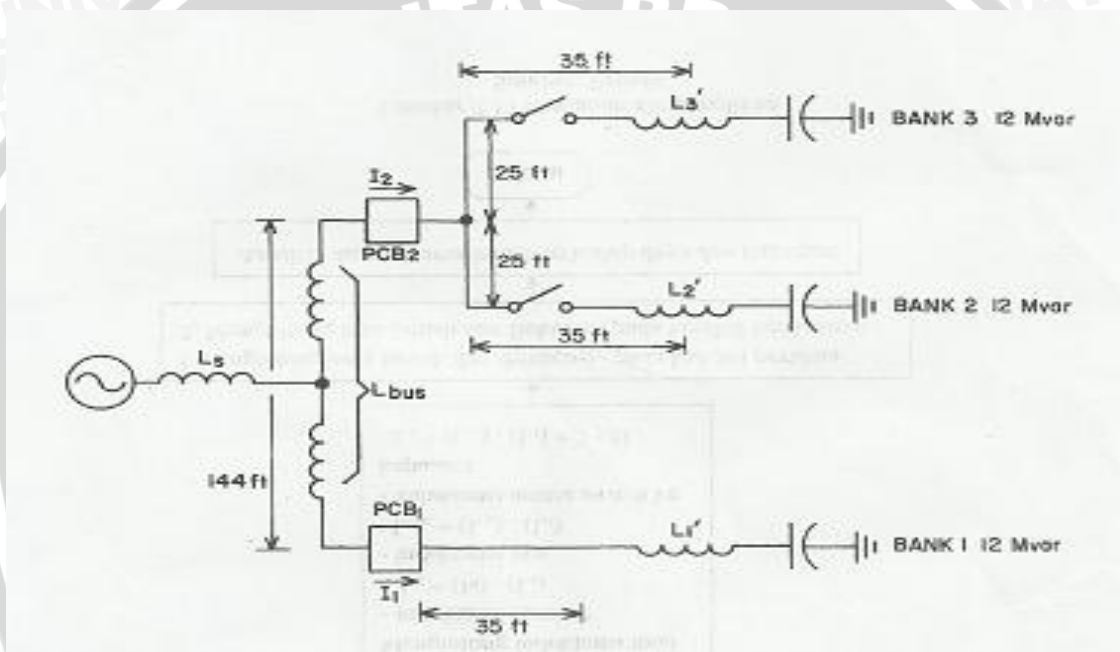
Tabel 2.2 Nilai Rata-Rata Dari Induktansi Diantara Kapasitor Bank

Rating Tegangan Maksimum (Kv)	Induktansi Per Fasa Pada Bus ( $\mu\text{h/M}$ )	Tipe Induktansi Antara Bank ( $\mu\text{h}$ )
17,5 Dan Dibawahnya	0,702	10-20
36	0,782	15-30
52	0,840	20-40
72,5	0,840	25-50
123	0,856	35-70

Rating Tegangan Maksimum (Kv)	Induktansi Per Fasa Pada Bus ( $\mu\text{H}/\text{M}$ )	Tipe Induktansi Antara Bank ( $\mu\text{H}$ )
145	0,840	40-80
170	0,879	60-120
245	0,935	85-170

\*Nilai dari induktansi diantara kapasitor bank tidak termasuk induktansi dari kapasitor, nilai  $5 \mu\text{H}$  untuk kapasitor bank yang dipasang dibawah tegangan  $52 \text{ kV}$  dan  $10 \mu\text{H}$  untuk kapasitor bank diatas  $52 \text{ kV}$  untuk besaran induktansi untuk kapasitor bank.  
Sumber: (IEEE Std C37.012-2005: 35)

Gambar 2.14 contoh pemasangan kapasitor bank pada suatu sistem tenaga listrik.



Gambar 2.14 *Single line* pemasangan kapasitor bank pada suatu sistem  
Sumber(IEEE Std C37.012-2005:36)

Dari Tabel 2.2, maka dapat ditentukan nilai induktansi pada sumber, induktansi pada bus dan induktansi diantara kapasitor dinyatakan: (ANSI/IEEE C37.012-1979)

$$L_{S-B} = (\ell_s) \cdot (L_t) \quad (2.35)$$

$$L_B = (\ell_{s-s}) \cdot (L_{BUS}) \quad (2.36)$$

$$L_1 = (\ell_{s-c}) \cdot (L_t) + 5 \mu\text{H} \quad (2.37)$$

dengan:

$L_B$  : Induktansi bus ( $\mu\text{H}$ )

$L_t$  : Nilai Induktansi Pada Tabel 2.2 ( $\mu\text{H}$ )



- $L_1$  : Induktansi antara *switch* ke kapasitor ( $\mu\text{H}$ )  
 $L_{S-B}$  : Induktansi antara bus dengan sumber ( $\mu\text{H}$ )  
 $(\ell_s)$  : Panjang konduktor antara bus dengan sumber (m)  
 $(\ell_{s-s})$  : Panjang konduktor antara *switch* pada kapasitor 1 dengan *switch* pada kapasitor 2 (m)  
 $(\ell_{s-c})$  : Panjang konduktor antara *switch* ke kapasitor (m)

## 2.5 Ukuran Kapasitor Untuk Perbaikan Faktor Daya

Ukuran kapasitor untuk memperbaiki faktor daya sistem pada titik-titik tertentu dapat dihitung, KVAR kapasitor yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya dari  $\cos \phi_1$  awal sampai dengan  $\cos \phi_2$  yang diinginkan dinyatakan

$$KVAR = kW (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (2.38)$$

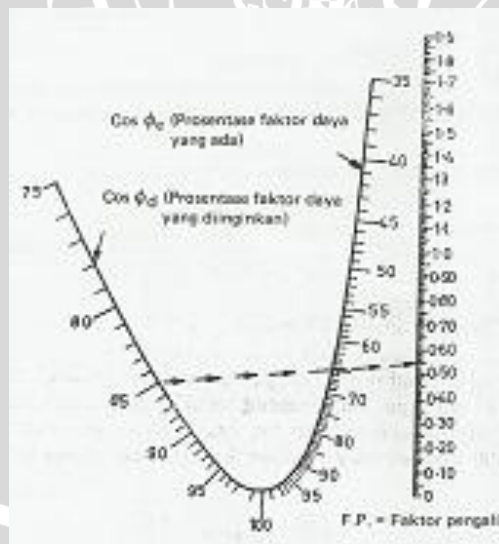
Atau

$$KVAR = kW \times MF \quad (2.39)$$

dengan

MF : faktor pengali

Nomogram pada Gambar 2.15 dapat menentukan besar faktor pengali.



Gambar 2.15 Nomogram untuk menghitung faktor pengali yang dibutuhkan untuk menentukan VAR kapasitor.

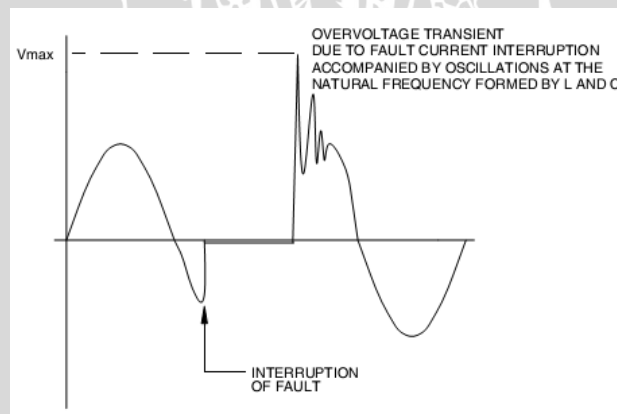
Sumber:AS.Pabla(1989:288)

Dengan bantuan Nomogram faktor pengali dapat ditentukan nilainya untuk mendapatkan nilai VAR yang sesuai.

## 2.6 Over Voltage Switching Kapasitor Bank

Kapasitor bank merupakan suatu komponen yang digunakan untuk memperbaiki kualitas daya dengan menaikkan  $\cos \phi$ , memperkecil drop tegangan, dan mengontrol daya reaktif. Dalam pengoperasian yang dikenal dengan nama *capacitor bank switching* dapat mengakibatkan dampak negatif pada kualitas daya yaitu mengakibatkan *transient overvoltage* yang dapat merusak peralatan sistem distribusi listrik. Terjadinya *transient overvoltage* yang tajam ini diakibatkan *short circuit* yang terjadi pada saat pelepasan muatan pada kapasitor selama pengisian. Selama terjadi perubahan tegangan yang disebabkan oleh *switching* kapasitor bank *on* dan *off* pada sistem akan dihasilkan *ripple effect* yang akan beresilasi sampai keadaan *steady state*.

*Trasient over voltage* ditunjukkan pada Gambar 2.16 karena *switching* kapasitor bank.



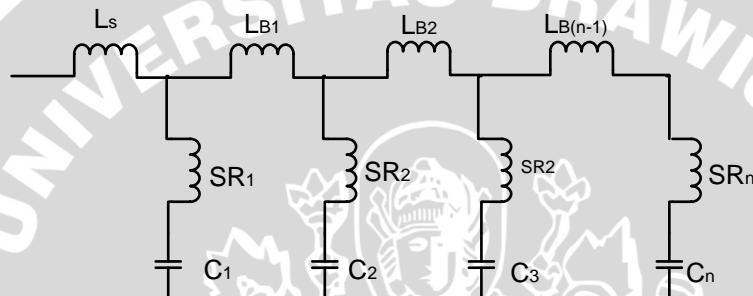
Gambar 2.16 *Transient Overvoltages*

Sumber: C.Sankaran, (2002:134)

Pengopersaian kapasitor bank selama beban puncak bertujuan untuk memberikan kompensasi terhadap VAR yang bersifat *lagging* pada beban. *Switching* pada kapasitor bank selalu disertai oleh lonjakan arus dan tegangan. Terjadinya *transient overvoltages* diikuti oleh kenaikan tegangan (*voltage rise*) yang akan beresilasi dengan frekuensi yang ditentukan oleh induktansi dan kapasitansi dalam rangkaian.

## 2.7 Penggunaan dan Prinsip Dasar Reaktor Pada Kapasitor Bank

Reaktor disebut juga sebagai induktor merupakan alat kompensasi yang digunakan untuk memperbaiki kinerja dari jaringan listrik. Penggunaan reaktor sering digunakan pada saluran transmisi untuk pengatur tegangan. Kompensasi dengan pemasangan reaktor juga dapat digunakan pada kapasitor bank untuk mereduksi arus transien ketika *switching* kapasitor bank dilakukan. Cara yang dilakukan untuk mereduksi arus transien pada kapasitor bank adalah dengan memasang induktor seri dengan kapasitor bank. Gambar 2.17 adalah contoh pemasangan reaktor yang seri dengan kapasitor.



Gambar 2.17 Pemasangan reaktor seri pada kapasitor bank  
Sumber: Larry M. Smith P.E, IEEE, 1994

Dengan parameter sebagai berikut:

- $L_s$  : Induktansi sumber ( $\mu\text{H}$ )
- $L_{B1}, L_{B2}$  : Induktansi bus ( $\mu\text{H}$ )
- $SR_1, SR_2, SR_3$  : Induktansi reaktor seri yang besarnya sama ( $\mu\text{H}$ )
- $C_1, C_2, C_3$  : Kapasitansi shunt (VAR)

Sebuah reaktor seri dinamakan peredam lilitan dimana lilitan disini adalah induktansi. Besarnya kapasitas *rating* suatu reaktor seri dapat diperoleh melalui persamaan berikut (Jonoadji Irawan. 1999. Skripsi tidak dipublikasi: 3):

$$Q_{3\phi} = 3 \cdot (I_{\text{dasar}})^2 \cdot X_{L.1} / 1000 \quad (2.40)$$

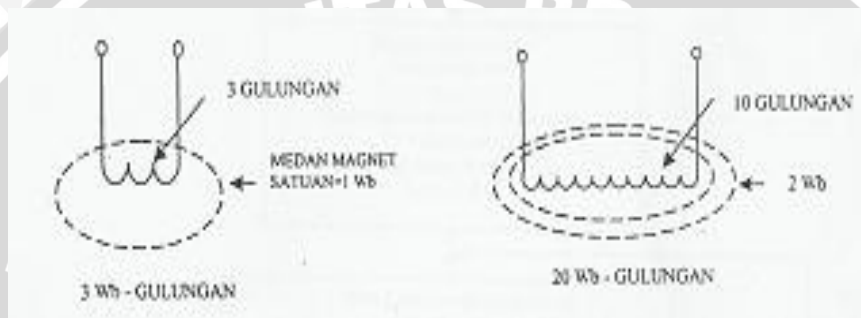
dengan:

- $Q_{3\phi}$  : Kapasitas reaktor (VAR)
- $I_{\text{dasar}}$  : Arus dasar (A)
- $X_L$  : Reaktansi ( $\Omega$ )

Sesuai dengan publikasi IEC 70 (AS Pabla 372). Arus sesaat (*inrush*) maksimum yang boleh diijinkan bekerja adalah 100 kali arus rms kapasitor

tersebut. Kapasitas reaktor seri yang harus digunakan sesuai dengan standart JIS-C-4092 yaitu 6% dari reaktansi kapasitor yang dipasang.

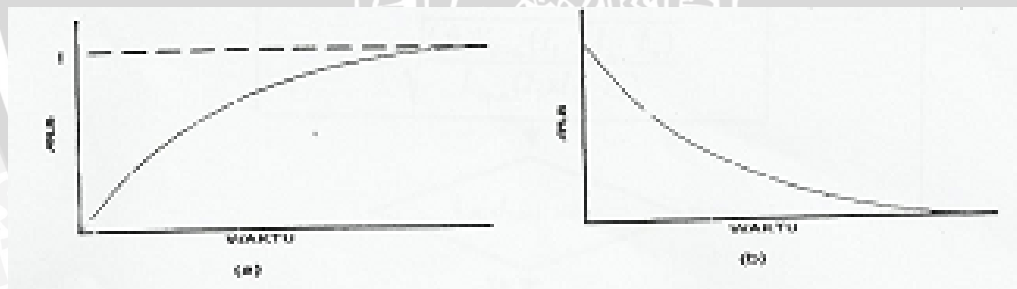
Sebuah reaktor yang sering kita kenal sebagai induktor apabila diberi sumber arus maka sesuai Hukum Lenz memberikan arah arah gaya gerak listrik induksi sedemikian hingga sehingga melawan perubahan arus yang akan menghasilkan ggl. Bahwa elektron yang bergerak atau arus listrik yang mengalir akan menghasilkan medan magnet. Namun kebalikan untuk menghasilkan arus listrik (arus induksi) perlu dilakukan perubahan medan magnet. Gambar 2.18 menunjukkan hubungan fluksi dinyatakan dalam weber-gulungan



Gambar 2.18 Hubungan fluksi dinyatakan dalam weber-gulungan

Sumber: Michael Neidle, 1989:20

Gambar 2.19 berikut adalah kurva waktu yang diperlukan oleh arus untuk mencapai nilai akhirnya dengan mempertahankan laju perubahan arus mula-mula.



Gambar 2.19 Efek induktansi terhadap arus

- a) Pada saat dihubungkan (*on*) b) pada saat diputus (*off*)

Sumber: Michael Neidle, 1989:21